

物質拡散・腐食と損傷を考慮した 鉄筋コンクリート構造物の劣化予測解析

東北大学工学部	学生員	○西 紳之介
東北大学災害科学国際研究所	正会員	寺田 賢二郎
東北大学大学院工学研究科	正会員	京谷 孝史
東北大学災害科学国際研究所	正会員	森口 周二
東北大学災害科学国際研究所	正会員	加藤 準治
東北大学災害科学国際研究所	正会員	高瀬 慎介

1. 序論

本研究では、鉄筋コンクリート構造物の主な劣化要因である腐食による耐荷力の変化を予測する手法を提示する。まず、腐食原因物質である酸素イオン、水、塩素イオンの拡散方程式と腐食反応の電気化学方程式を解き、経時変化する各原因物質の濃度分布を算出する。レベルセット法を用いて鉄筋とコンクリートの界面を再現し、算出した腐食反応速度からレベルセット関数を更新することで、界面の変化を追跡する。その際、材料特性分布にはヘビサイド関数を用いて、この初期の値との差分から決定した腐食領域に応じて、腐食生成物とそれに伴う体積膨張圧を与える。コンクリートの材料構成則には損傷力学モデルに適用し、負荷圧力、ひび割れ進展解析を行った後に外力を与え、耐荷力を算定する。この連成解析を腐食原因物質の拡散年数を変えながら繰り返し行い、経年的に変化する耐荷力の変化を予測する。

2. コンクリートの電気化学反応と腐食進展

(1) 腐食原因物質の反応拡散問題

腐食原因物質である酸素、水、塩化物イオンの拡散問題は、非定常拡散方程式であり、各原因物質を e とすると次式のように表される。

$$\frac{-\partial c_e}{\partial t} = -\nabla \cdot (-D_e \nabla c_e) \quad (1)$$

酸素、水が鉄筋表面に到達すると化学反応式 $\text{Fe} + \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$ に対応する化学反応が始まり腐食が発生する。腐食の開始には鉄の不動態皮膜を破壊する塩化物イオン濃度が重要であり、 $\frac{[\text{Cl}^-]}{[\text{OH}^-]} \geq 0.6$ で定義されている。鉄筋の腐食反応式は電気化学理論に基づいており、鉄筋界面の移動速度は Faraday の法則によって、腐食電流密度 i_{corr} から算出する。 i_{corr} は、各物質における Tafel 式と Nernst 式から決定する。

(2) 界面と構成材料分布の進展解析

本研究では、鉄筋腐食の界面移動の表現手法としてレベルセット法を採用する。レベルセット関数は界面との最短距離を示す関数であり、界面の内側と外側を正負でわけること

で、異なる材料を判断する。本研究では解析モデルとは別に鉄筋の表面を表すモデルを用意し、解析モデルの各節点と鉄筋モデルの各節点との最短距離を出して、それをレベルセット値とする。また、前章で算出した腐食反応速度から移動距離を決定し、それを鉄筋表面の法線方向に加えることで、鉄筋の界面を更新する。材料の分布は 0 から 1 の値を持つヘビサイド関数により定義している。また、ヘビサイド関数が増加した領域を腐食領域として、次章の膨張変形導入に利用する。

3. 腐食による膨張ひずみの導入と損傷モデルによる劣化解析

(1) 膨張ひずみの導入

本論文では変形挙動を有限変形の枠組みで記述し、変形勾配 $\mathbf{F}$ は弾性変形と腐食膨張による膨張変形の積 $\mathbf{F}^e \mathbf{F}^{\text{corr}}$ で表されるものとする。ここで、膨張変形勾配は以下のように定義する。

$$\mathbf{F}^{\text{corr}} = \mathbf{I} + \alpha \mathbf{I} \quad (2)$$

α は体積膨張率であり、ヘビサイド関数の差分と関連付けられる。

(2) 損傷モデルの定式化

本研究では、損傷モデルにおける弾性構成則を次式で定義する。

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = (1 - D) \mathbf{C} : \mathbf{d} \quad (3)$$

ここで、 $\boldsymbol{\sigma}$ は Cauchy 応力、 $\dot{\boldsymbol{\sigma}}$ はその Jaumann 速度、 $\mathbf{d}$ は力学的変形速度、 $\mathbf{C}$ は弾性係数である。 D は損傷の進展を支配する損傷変数であり、 $D = 0$ のときは損傷が発生せず、 $D = 1$ では材料が完全に剛性を失った状態を表す。本研究では損傷変数には以下の関数を用いる¹⁾。

$$D(\kappa) = 1 - \frac{\kappa_0}{\kappa} \left(\exp \frac{E \kappa_0 h_e}{A} (\kappa_0 - \kappa) \right) \quad (4)$$

ここで、 κ_0 は、材料が経験した最大相当ひずみであり、 d_e の等価ひずみ式より算出する。 κ_0 は損傷発生ひずみ閾値である。また h_e は要素長さで、 E はヤング率である。

Key Words: 鉄筋コンクリート構造物, 腐食, 膨張ひずみ, 損傷モデル

〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06, TEL 022-795-7425, FAX 022-795-7423

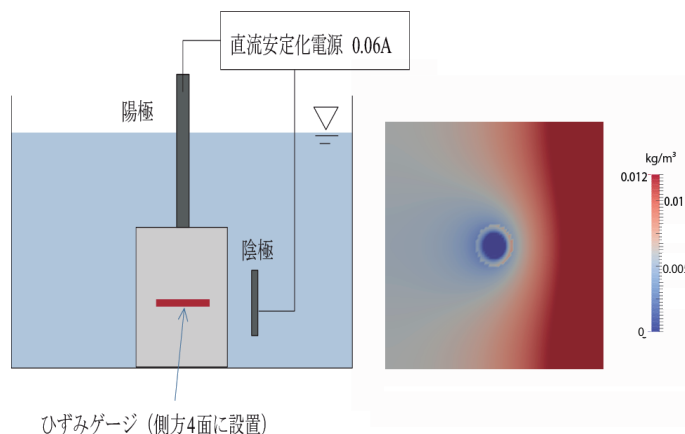


図-1 腐食促進試験概要図, 塩化物イオン濃度拡散分布図

表-1 腐食膨張力学解析における材料特性

	ヤング率	κ_0
コンクリート	30 GPa	0.0001
鉄筋	200 GPa	0.02
腐食生成物	0.245 GPa	0.0005

A は損傷の進展率を支配する値であり, 損傷の進展の程度が変化する. 損傷の発生はひずみ閾値 ϵ_{eq} が κ_0 を上回った場合におこるものとする. ここで k は引張圧縮強度比, ν はポワソン比, I_1, J_2 はひずみテンソルの不変量である. また, 後述の付着強度試験の際には腐食生成物による引張抵抗を考慮して, 引張に強くなるようなひずみモデルにしている.

4. 数値解析例

(1) 腐食原因物質の反応拡散解析

腐食促進試験の概略図を図-1の右図に示す. 本節では, この実験条件と同様に酸素4面浸漬, 塩化物イオン1面浸漬という境界条件で数値試験を行った.

(2) 損傷変形との連成解析

本節では, 反応拡散解析から得られた腐食領域進展データを用いて腐食膨張・損傷解析を行う. 腐食膨張・損傷の連成解析では, 図-1のように置かれた状態の境界条件で腐食膨張のみを与えている. 図-2に応力図とひび割れの様子を示す. 応力図中心の円はコンクリートと鉄筋の界面を表しており, その界面に沿って応力が分布していることがわかる. ひび割れ図は損傷変数が1である位置をひび割れ箇所とする. コンクリートの主な材料特性値を表-1にまとめる.

(3) 付着強度試験

腐食膨張解析を行ったモデルから, 鉄筋部分に強制変位を与え, 付着強度を算定する. 腐食によってひびが入る前後3パターンの変位荷重曲線を図-3に, 腐食量と付着強度の関係を図-4に示す. 腐食生成物が引き抜き方向に抵抗することにより付着強度が上昇し, 腐食膨張によってひび割れが入る

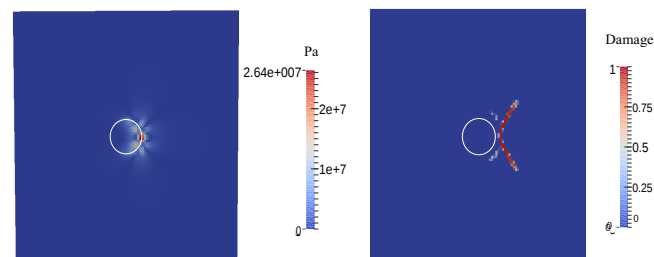


図-2 腐食膨張応力, ひび割れ分布図

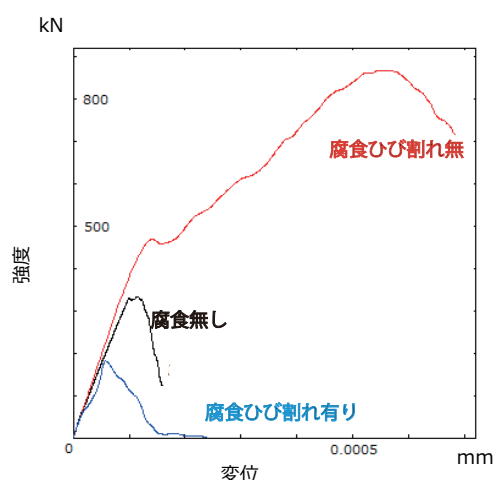


図-3 変位荷重曲線

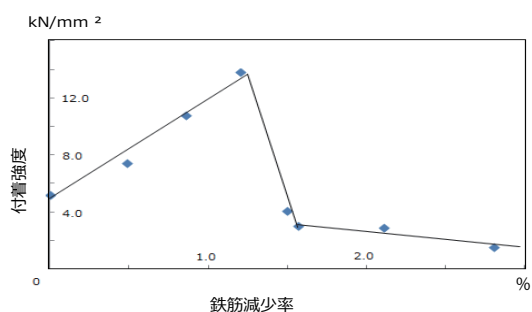


図-4 鉄筋腐食減少率-付着強度

ことで一気に強度が失われるという実験でも確認されている結果を再現することができた.

5. 結論

本研究では, 鉄筋腐食を受けた鉄筋コンクリート構造物の耐荷力評価のための腐食反応, 拡散, 力学連成解析手法を提案した. 特に, 腐食原因物質拡散解析から鉄筋腐食をシミュレートし, それをもとに膨張・ひび割れ解析を行うことで, 鉄筋コンクリート構造物の耐荷力を評価できる可能性を示した.

参考文献

- 1) 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 加藤準治, 樫山和男: コンクリートの破壊力学に基づく等方性損傷モデルの定式化とその性能評価